

Approved For Release STAT
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130

Dec

Approved For Release
2009/08/31 :
CIA-RDP88-00904R000100130



Вторая Международная конференция
Организации Объединенных Наций
по применению атомной энергии
в мирных целях

A/CONF/15/P/2307
US3R
ORIGINAL: RUSSIAN

Не подлежит оглашению до официального сообщения на Конференции

"ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА СТРУКТУРУ
И СВОЙСТВА УРАНА".

Сергеев Г.Я., Титова В.В., Николаева З.П.,
Каптельцев А.М., Колоснева Л.И.

В В Е Д Е Н И Е

Изделия из урана работают в атомных реакторах при повышенных температурах в условиях сложного напряженного состояния. Поэтому изучение структуры и свойств урана в связи с условиями эксплуатации в реакторах стоит в ряду центральных проблем атомной энергетики.

В литом состоянии или после пластической деформации в γ -области уран крупнозернист, сравнительно тверд и при этом имеет невысокую прочность (предел прочности порядка $30-35 \text{ кг/мм}^2$) и малую пластичность (удлинение - 5%). Кроме того, α -уран обладает ярко выраженной анизотропией физических и механических свойств. Изделиям из урана свойственно формоизменение под воздействием облучения.

В связи с этим решение проблемы повышения срока службы изделий в реакторах связано с решением задачи изменения строения и свойств урана в нужном направлении.

Как известно, основными путями изменения строения и свойств чистых металлов являются: термическая обработка, деформация с последующим рекристаллизационным отжигом, легирование. Все эти методы обычно применяются и к урану.

25 YEAR RE-REVIEW

№ 2849

- 2 -

Ниже излагаются некоторые результаты исследования изменения структуры и механических свойств литого или горячекатаного урана путём термической обработки (закалки), а также путем деформации и отжига при температурах α - области.

1. СТРУКТУРА И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОГО И ГОРЯЧЕКАТАНОГО УРАНА

Зерна литого или горячекатаного урана размером 1,5-2 мм состоят из субзерен размером 200-500 микрон (рис 4а). Отличие в кристаллографической ориентировке субзерен не превышает $5-10^\circ$.

Механические свойства урана различных плавок, определенные при кратковременных испытаниях на растяжение в диапазоне температур $20-850^\circ$, иллюстрирует рис 1. Испытывались стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части 5 мм; длина рабочей части 25 мм. Широкий диапазон изменения предела прочности и удлинения связан с колебанием содержания примесей в металле исследованных плавок.

С повышением температуры в α - области от 20° до 670° прочность падает при одновременном возрастании пластичности. Следует отметить неоднократно наблюдавшееся аномальное изменение характеристик прочности урана в температурном интервале $20-100^\circ\text{C}$. Значения предела прочности с изменением температуры от 20° до 100° увеличиваются, в то время как значения предела текучести уменьшаются.

С переходом в область температур β - фазы наблюдается возрастание предела прочности и уменьшение пластичности. С переходом в γ - область имеет место резкое падение прочности и возрастание пластичности.

При длительном пребывании в нейтронном поле изделия из урана испытывают деформацию под воздействием напряжений, возникающих благодаря наличию в них температурного градиента и вследствие образования термических пиков в результате актов деления.

2849-60

- 3 -

В связи с этим определенным интерес представляло исследование сопротивляемости урана ползучести в зависимости от состояния материала и условий испытания.

Ползучесть литого и горячекатаного урана была исследована в температурном диапазоне $20-600^{\circ}$ при различных напряжениях. Продолжительность испытаний соответствовала 700-1000 часам при повышенных температурах и до 6000 часов при комнатной температуре. При повышенных температурах ползучесть исследовалась в атмосфере очищенного гелия. Применялись стандартные цилиндрические образцы: диаметр рабочей части $10 \pm 0,05$ мм; длина рабочей части 100 мм.

В таблице I приведены результаты отдельных испытаний на ползучесть, а на рис 2 показана зависимость скорости ползучести горячекатаного урана от напряжений при температурах $20-600^{\circ}\text{C}$. Скорость ползучести урана резко возрастает с повышением температуры, особенно при температурах, превышающих 400° .

II. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ.

В наших исследованиях основным видом термической обработки урана являлась операция, условно называемая закалкой. Она осуществлялась путем нагрева металла до температур β - или

γ -фаз с последующим быстрым охлаждением в воде или масле. В этом случае термин "закалка" следует считать условным в связи с тем, что при такой термической обработке урана обычной чистоты не происходит фиксирования при комнатной температуре ни высокотемпературных, ни промежуточных фаз.

Однако закалка приводит к резкому изменению структуры и свойств урана.

Определялась зависимость механических свойств от условий закалки (температуры нагрева, скорости охлаждения), а также стабильность свойств закаленного металла при нагреве.

Таблица I.

Сопротивляемость урана ползучести в зависимости
от температуры и напряжений.

Темпера- тура испытания °C	Напряже- ние, σ кг/мм ²	Деформация в момент на- грузки ϵ_0 %	Скорость ползу- чести $\dot{\epsilon}$ %/ час	Интервал замера скорости ползучес- ти (час)	Суммарная дефор- мация ползучес- ти за (час)		Примеча- ние:
					ϵ	$\epsilon\%$	
20	25	0,70	$2,3 \cdot 10^{-5}$	1100-3300	3300	1,12	Образец не разор- вался
100	20	0,88	$7,3 \cdot 10^{-5}$	560-1050	1050	1,28	"
200	18	0,49	$2,7 \cdot 10^{-5}$	360-820	820	0,63	"
300	18	0,58	$1,0 \cdot 10^{-4}$	200-815	815	0,81	"
400	10	0,15	$6,1 \cdot 10^{-4}$	300-735	735	0,70	"
500	3	0,05	$1,1 \cdot 10^{-3}$	275-750	800	1,05	"
600	1	0,02	$2,0 \cdot 10^{-3}$	25-150	850	3,15	"

- 5 -

1. Изменение механических свойств урана в зависимости от условий закалки.

Закалка с температур β -и γ - фаз приводит к резкому изменению структуры металла и значительному повышению прочностных характеристик, определенных как при кратковременных (рис 3), так и при длительных испытаниях в соответствующем диапазоне температур. Наибольшее изменение пределов прочности и текучести наблюдается после закалки из γ - области (примерно на 60% при комнатной температуре). Характеристики пластичности при этом изменяются мало.

Рис. 4 иллюстрирует изменение структуры урана при закалке. Наблюдается значительное измельчение зерна урана, причем степень измельчения зерна, так же как и прочностные характеристики закаленного урана, зависит от химического состава металла и соотношения примесей, в первую очередь таких, как железо, кремний, никель и алюминий (рис. 5 и 6).

Было установлено, что скорость охлаждения в процессе закалки оказывает существенное влияние на свойства закаленного металла. Рис. 7 иллюстрирует изменение свойств литого урана, закаленного из γ - области в воде, температура которой изменялась от 20° до 100°C.

Аналогично изменяются механические свойства и при закалке в различные охлаждающие среды. Так, горячекатаный уран, имевший предел прочности 38 кг/мм², после закалки с 950° (выдержка 30 минут) в воде показал значение предела прочности равное 64 кг/мм², после закалки в масле - 45 кг/мм² и после закалки в токе аргона - 40 кг/мм².

2. Изменение механических свойств закаленного урана при нагреве.

Для урана, закаленного из β - и γ - областей значения характеристик прочности с повышением температуры постепенно сни-

- 6 -

жаются, оставаясь, однако, при всех температурах α - области большими, чем те же характеристики при соответствующих температурах для незакаленного урана (рис 8).

Результаты испытаний закаленного урана на ползучесть позволили установить, что закалка из β - и γ -областей повышает сопротивляемость урана ползучести при температурах меньших 400° и уменьшает ее при более высоких температурах по сравнению с сопротивляемостью ползучести литого или горячекатаного металла (см. табл. 2).

На рис. 9 приведены первичные кривые ползучести, полученные при 300° (а) и 500° (б) для горячекатаного и закаленного из β - и γ -областей урана, а на рис. 10 показано изменение скорости ползучести в зависимости от напряжения при 500° для горячекатаного урана и урана той же плавки, закаленного из β - и γ -фаз.

При температурах, превышающих 300° , в процессе деформации урана значительную роль начинает играть течение по границам зерен. В связи с этим деформация мелкокристаллического закаленного металла с большой поверхностью границ протекает значительно легче, чем деформация крупнокристаллического литого или горячекатаного урана. При низких температурах, когда, как известно, деформация в основном осуществляется путем двойникования (I), упрочненный закалкой мелкокристаллический уран обладает значительно большей сопротивляемостью деформации.

Меньшая сопротивляемость ползучести при 400° закаленного урана по сравнению с незакаленным отмечена и в работе (2).

Было установлено, что закалка повышает на $30-40^{\circ}$ температурный интервал, в котором наблюдается резкое ускорение ползучести. Так, для горячекатаного урана область начала ускоренной ползучести находится в интервале температур $300-350^{\circ}$, а для закаленного - $350-375^{\circ}\text{C}$ (рис 18).

На рис. II приведен график изменения механических свойств закаленного урана в зависимости от температуры отпуска.

09-6482

Получить закаленного урана в зависимости от температуры испытания и напряжения.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
84

Прод. табл. 2.

I	2	3	4	5	6	7	8	9
	Горячекатаный	4	0,04	$3,5 \cdot 10^{-3}$	75-500	745	2,80	Образец не разорвался
500	Горячекатаный, закаленный из γ -области	4	0,08	$1,3 \cdot 10^{-2}$	50-175	735	$\delta = 26,7\%$	Образец разорвался
	Литой	4	0,04	$1,3 \cdot 10^{-3}$	40-520	520	0,87	Образец не разорвался
	Литой, закаленный из γ -области	4	0,05	$7,3 \cdot 10^{-3}$	40-340	520	4,92	" "

1
∞
1

- 9 -

Закаленный уран сохраняет высокие значения пределов прочности и текучести после отпуска при температурах α - области и лишь после нагрева при температурах β - фазы наблюдается резкое падение значений характеристик прочности.

III. ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ И МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УРАНА МЕТОДОМ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСЛЕДУЮЩЕГО РЕКРИСТАЛЛИЗАЦИОННОГО ОТЖИГА ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ α - ОБЛАСТИ.

I. Изменение структуры урана в процессе деформации и рекристаллизации.

В результате исследования микроструктуры деформированного и отожженного при температурах α - области урана были определены основные параметры рекристаллизации и построены приближенные диаграммы рекристаллизации для металла различной чистоты. Одна из таких диаграмм приведена на рис. I2. Она характеризует изменение величины рекристаллизованного зерна в зависимости от степени деформации и температуры отжига.

Температура начала рекристаллизации для урана соответствует $370-430^{\circ}$, температура полной рекристаллизации - $450-625^{\circ}$ (в зависимости от степени деформации). Критическая степень деформации меньше 5%. Интенсивная собирательная рекристаллизация наблюдается при $625-650^{\circ}$. Эти данные в основном согласуются с имеющимися литературными данными (3).

Путем деформации и отжига крупнокристаллическая структура литого или горячекатаного урана может быть превращена в мелко - кристаллическую с однородным по величине зерном размером 20-30 микрон (рис. I4).

Течение процессов рекристаллизации, как известно, сильно зависит от содержания в металле примесей и легирующих элементов. Имеются указания о существенном влиянии примесей на рекристаллизацию урана (3). Однако сколько - нибудь подробные сведения по

- 18 -

этому вопросу в литературе отсутствуют.

На рис. 13 представлена диаграмма рекристаллизации сплава урана с 0,1 вес % молибдена. Сравнение этой диаграммы с диаграммой рекристаллизации чистого урана свидетельствует о том, что указанное количество молибдена в значительной степени тормозит рекристаллизацию урана.

2. Механические свойства урана, подвергнутого деформации и отжигу при температурах α -области.

Графики рис. 15-а, б, иллюстрируют изменение механических свойств урана, определенных при кратковременных испытаниях на растяжение, в зависимости от степени деформации при прокатке.

Приведенные данные показывают, что с увеличением степени деформации значительно возрастают характеристики прочности. Так, предел прочности горячекатаного урана, служившего исходным материалом при прокатке, был равен $40,6 \text{ кг/мм}^2$, а прокатанного при 500° с обжатием 50% — $70,8 \text{ кг/мм}^2$, т.е. возрос на 74%. При этом характеристики пластичности почти не изменились.

Рекристаллизационный отжиг приводит к некоторому снижению характеристик прочности (рис 15б), однако, при всех рассмотренных степенях деформации, прочность рекристаллизованного металла существенно превышает прочность исходного горячекатаного металла.

На рис. 16 приведен характерный график "нагрузка — деформация", полученный в процессе растяжения при 20° плоского образца, вырезанного в направлении прокатки из рекристаллизованного уранового листа. Скачкообразное циклическое изменение нагрузки в процессе испытания является признаком так называемого "лавинного двойникования" и было отмечено для цинка и кадмия при комнатной температуре (4) и для меди при температуре $4,2^\circ \text{ К}$ (5). Приведенные данные наглядно свидетельствуют о том, что при комнатной температуре двойникование, как установлено Каном (1).

2849-60

- II -

являются основным механизмом деформации урана. В процессе испытания таких образцов скачкообразное падение нагрузки сопровождалось потрескиванием и ярким искрением.

Пластическая деформация и рекристаллизация заметно влияют на сопротивляемость урана ползучести. Результаты испытаний, проведенных при 300° и различных напряжениях (таблица 3), показывают, что наибольшую скорость ползучести в условиях опыта имел мелкозернистый рекристаллизованный уран.

Так, например, при напряжении равном 22 кг/мм^2 скорость ползучести рекристаллизованного урана в 3-4 раза больше скорости ползучести урана, прокатанного при 500° с теми же степенями деформации и примерно в 5 раз больше, чем скорость ползучести исходного горячекатаного урана. При этом следует отметить большую деформацию рекристаллизованного урана в период неустановившейся ползучести (см. рис. 17).

Сопротивляемость ползучести рекристаллизованного урана зависит также от степени деформации при прокатке. Так, например, при 300° и напряжении 22 кг/мм^2 для урана, деформированного на 15% и 50% и рекристаллизованного при 600° в течение 2-х часов, скорости ползучести равны $4,2 \cdot 10^{-4} \%$ /час и $1,4 \cdot 10^{-3} \%$ /час, а остаточные деформации 1,55% и 3,05% соответственно. Рекристаллизованный уран имеет более низкую температуру начала ускоренной ползучести. Рассматривая зависимость суммарной деформации образцов за 500 часов испытания при напряжении 22 кг/мм^2 от температуры, можно видеть, что ускоренная ползучесть рекристаллизованного урана наблюдается с $225-275^{\circ}$, в то время как для горячекатаного урана эта область расположена в температурном интервале $300-350^{\circ}$, а для закаленного урана при еще более высоких температурах. Эти данные представлены графически на рис 18.

3. Анизотропия механических свойств рекристаллизованного урана.

Уран, в силу специфики строения кристаллической решетки α -фазы, обладает ярко выраженной анизотропией физических и

Таблица 3.

Влияние степени деформации при прокатке в α -области и напряжений, приложенных в процессе испытаний, на ползучесть урана (температура испытания 300°C).

Состояние; термическая обработка	Напря- жение 2 кг/мм ² (σ)	Деформа- ция в момент нагруже- ния ε, %	Скорость ползучести V % / час	Интервал замера ско- рости пол- зучести (час)	Суммарная де- формация ползучести (час)	Примеча- ние:	
I	2	3	4	5	6	7	8
Исходный го- рячекатаный уран	15	0,25	3,6.10 ⁻⁵	200-475	475	0,33	Образец
	18	0,45	7,0.10 ⁻⁵	100-475	475	0,59	не разор-
	22	1,19	2,3.10 ⁻⁴	100-455	460	1,72	вался.
Уран, прокатан- ный при 500 со степенью деформации равной 45%	15	0,12	1,0.10 ⁻⁴	100-500	500	0,30	"
	18	0,18	1,4.10 ⁻⁴	210-540	540	0,45	"
	22	0,20	2,5.10 ⁻⁴	100-540	540	0,55	"

2840-60

Прод. табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
То же + отжиг при 600° в течение 2-х часов	15 18 22	0,18 0,20 0,56	$9,7 \cdot 10^{-5}$ $5,1 \cdot 10^{-4}$ $1,9 \cdot 10^{-3}$	160-550 330-550 400-550	550 550 550	0,36 0,97 3,58	образец не разбавлялся " " " "
Уран, про- катанный при 500° со стеленью деформации равной 60%	15 18 22	0,15 0,19 0,22	$1,8 \cdot 10^{-4}$ $2,9 \cdot 10^{-4}$ $4,0 \cdot 10^{-4}$	200-475 200-500 200-460	475 500 500	0,35 0,57 0,67	" " " " " "
То же + отжиг при 600° в те- чение 2-х часов	15 18 22	0,18 0,24 0,54	$1,4 \cdot 10^{-4}$ $4,0 \cdot 10^{-4}$ $1,2 \cdot 10^{-3}$	220-455 200-455 320-455	460 460 460	0,47 0,79 3,00	" " " " " "

- 14 -

механических свойств, которая особенно заметно проявляется после деформации в α - области, вследствие возникновения текстуры.

На рис.19 показано изменение предела прочности при растяжении для листового урана в зависимости от направления вырезки образцов. Образцы, вырезанные в направлении прокатки, имели на 30% больший предел прочности, чем образцы, вырезанные в перпендикулярном направлении. После рекристаллизационного отжига различие в значениях пределов прочности составляло 15%, т.е. такая термическая обработка не ликвидирует анизотропию механических свойств текстурированного урана

Характерно, что в случае деформации текстурированного урана методом осаживания, соотношение значений предела прочности в зависимости от направления вырезки образцов обратно тому, которое имеет место при деформации растяжением. В случае осаживания прочность образцов, вырезанных вдоль направления прокатки меньше, чем прочность образцов, вырезанных в перпендикулярном направлении.

Эти результаты могут быть связаны с представлениями Кана о существовании в уране направлений затрудненной деформации(I).

Как было отмечено выше, изделия из литого или горячекатаного урана, в силу специфики строения и свойств α - фазы, подвержены формоизменению под воздействием облучения и при циклической термической обработке. При наличии текстуры это формоизменение становится направленным.

Результаты исследований показали, что изменяя степень квазианизотропии изделий и механические свойства путем применения различных видов закатки, деформации и отжига при температурах α - области, можно в широком диапазоне регулировать формоизменение изделий из урана под действием указанных факторов.

2849-02

- 15 -

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Закалка урана из областей β - и γ - фаз, приводит к измельчению зерна, повышает квазиизотропию изделий при одно - временном повышении предела прочности (до 60%).

Закалка урана в несколько раз увеличивает его сопротивляемость ползучести при температурах меньших 400° и уменьшает ее при более высоких температурах α - области.

Деформация, даже после последующего рекристаллизационно - го отжига в температурном диапазоне α - области, приводит к возникновению в уране текстуры, резкому измельчению зерна (при степенях деформации 30-40% и выше) и повышению прочности в области температур α - фазы.

Указанная обработка значительно снижает сопротивляемость урана ползучести при температурах, превышающих 300°.

Применение термической обработки (закалки) и деформации с последующим рекристаллизационным отжигом позволяет в широких пределах изменять структуру и механические свойства урана.

- 16 -

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Cahn R.W., "Plastic Deformation of Alpha-Uranium Twinning and Slip". Acta Met., 1, 149, (1953).
2. Nichols R.W., "Uranium and its Alloys". Nuclear Engineering, 2, (18) 355 (1957).
3. Foote Frank O., "Physical Metallurgy of Uranium".
Доклад № 555. Материалы Международной конференции 1955 г. по мирному использованию атомной энергии.
4. Борретт Ч.С., "Структура металлов". Металлургиядет 1948 г.
5. Blewitt T.H., Coltman R.R., and Redman J.K., "Low - Temperature Deformation of Copper Single Crystals".
Journal of Applied Physics, 28, (6) 651 (1957).

-17-

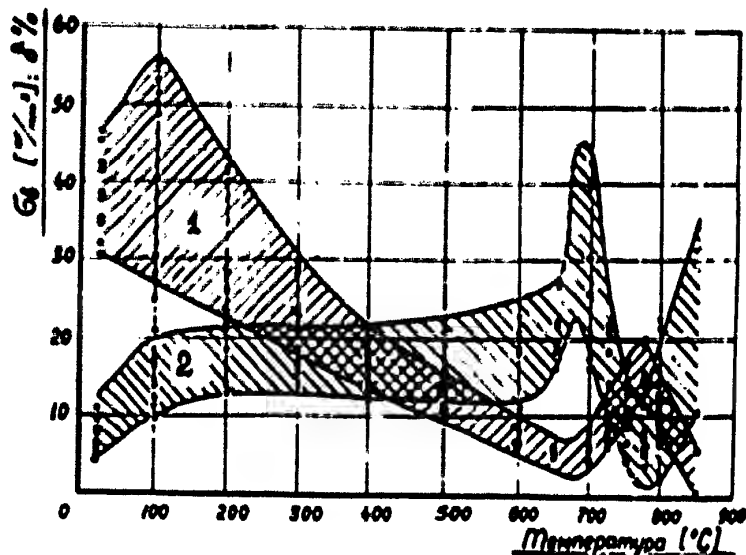


Рис I. Влияние температуры на механические свойства горячекатаного урана. Испытания проведены в атмосфере аргона. Содержание основных примесей в уране исследованных плавов:

$$\text{Fe} = 5 \cdot 10^{-3} \div 8 \cdot 10^{-2} \%;$$

$$\text{Si} = 2 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-2} \%;$$

$$\text{C} = 0,01 \div 0,15 \%$$

1 - предел прочности [б_в]

2 - относительное удлинение. [δ]

- 113 -

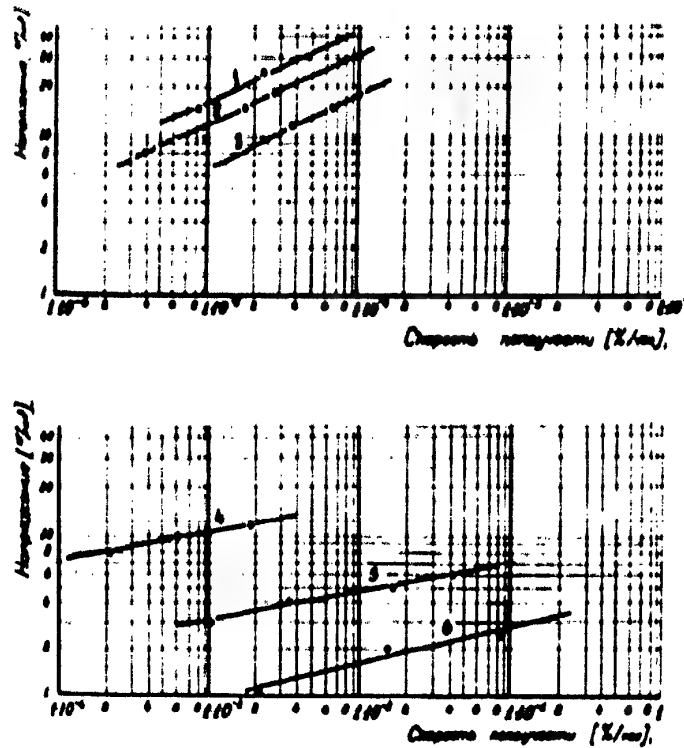


Рис 2. Изменение скорости ползучести горячекатаного урана в зависимости от температуры и напряжения.

Содержание основных примесей в уране: $Fe = 4,8 \cdot 10^{-3}\%$; $Si = 1,4 \cdot 10^{-3}\%$; $Ni = 1,8 \cdot 10^{-4}\%$; $C = 0,01\%$

1 - температура испытания	-	20°
2 - " "	-	200°
3 - " "	-	300°
4 - " "	-	400°
5 - " "	-	500°
6 - " "	-	600°

0144-60

-10-

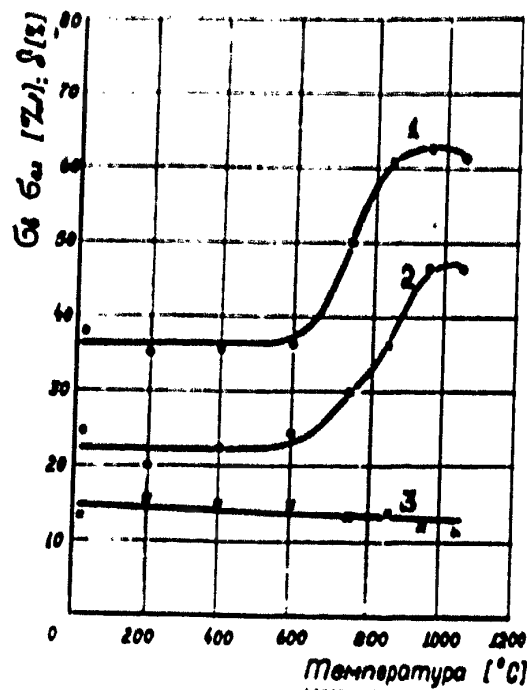


Рис 3. Изменение механических свойств горячекатаного урана в зависимости от температуры закалки. Продолжительность выдержки перед закалкой - 80 минут; охлаждение в масле.

Содержание основных примесей в уране:

$$\text{Fe} = 7 \cdot 10^{-8} \%$$

$$\text{Si} = 1,2 \cdot 10^{-8} \%$$

$$\text{C} = 0,04\%$$

1 - предел прочности - σ [%]

2 - условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$ [%]

3 - относительное удлинение - δ [%]

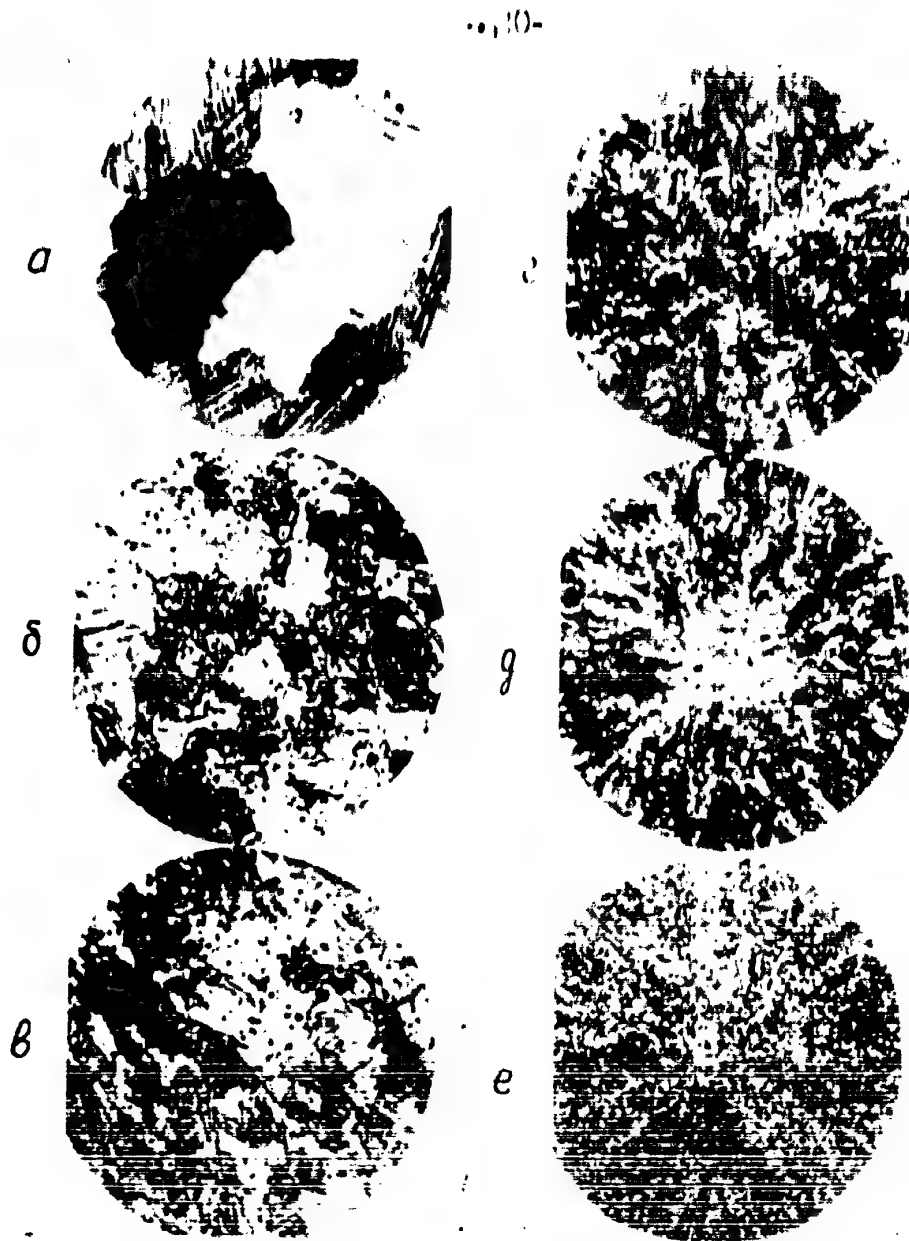


Рис - 4. Изменение структуры урана при закалке.

а- микроструктура литого урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $1,5 \cdot 10^{-2}\%$ $\times 70$.

б- микроструктура закаленного из γ -фазы урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $5 \cdot 10^{-2}\%$ $\times 135$.

в- микроструктура закаленного из γ -фаз урана. Суммарное содержание железа, кремния и алюминия $1 \cdot 10^{-1}\%$ $\times 135$.

г; д; е - микроструктуры образцов а, б и в соответственно $\times 2$.

2849-60

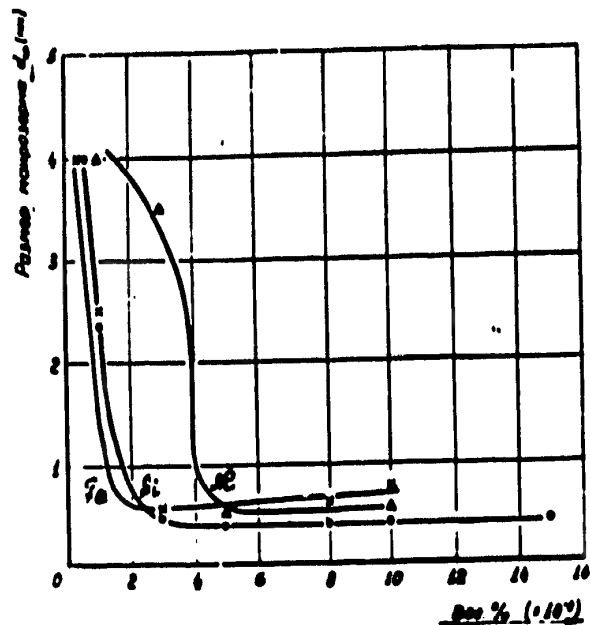
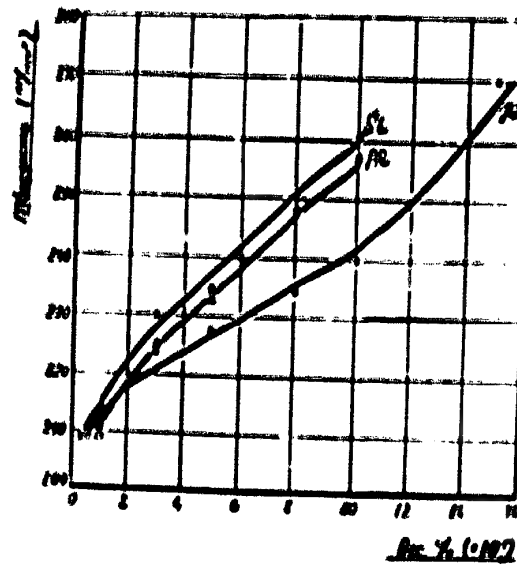
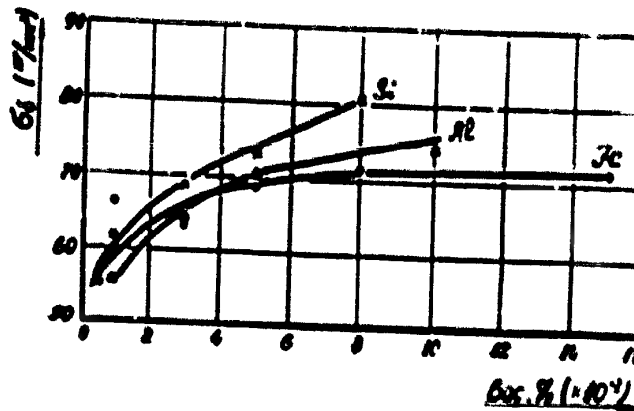


Рис 5. Влияние содержания железа, кремния и алюминия в уране на величину макрокристаллов.

а



б



в

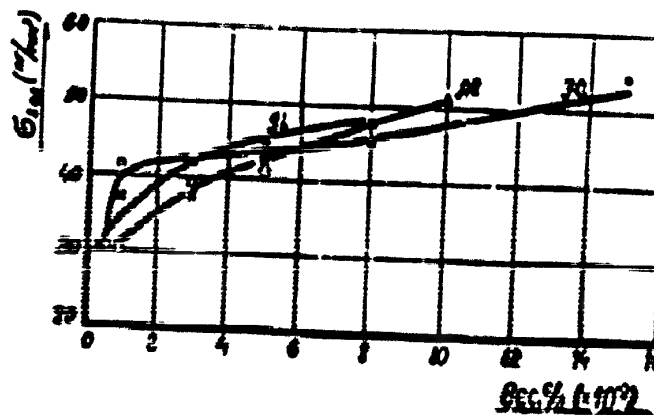


Рис 6.

Влияние содержания железа, хрома и алюминия в уране на твердость (а), предел прочности (б) и предел текучести (в). Температура испытания 20°C.

0149-6с

-23-

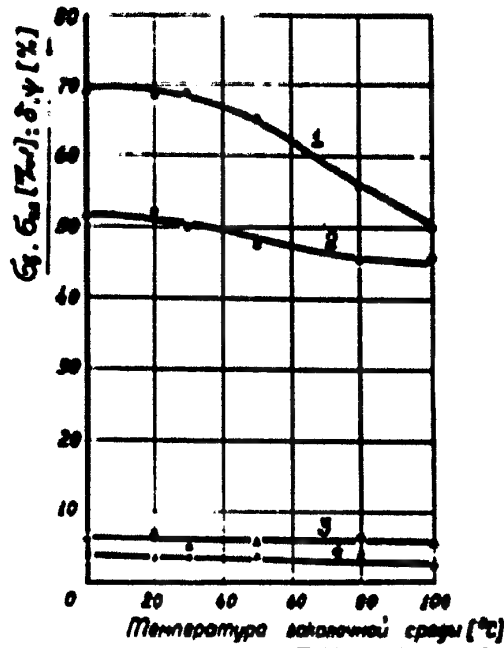


Рис 7. Влияние температуры закалочной среды на механические свойства литого урана, закаленного с 850° в воду.

(Выдержка 30 минут)

- 1- предел прочности - σ [кг/мм²]
- 2- условный предел текучести - $\sigma_{0.2}$ [кг/мм²]
- 3- относительное удлинение - δ [%]
- 4- относительное сужение площади поперечного сечения - ψ [%]

-24-

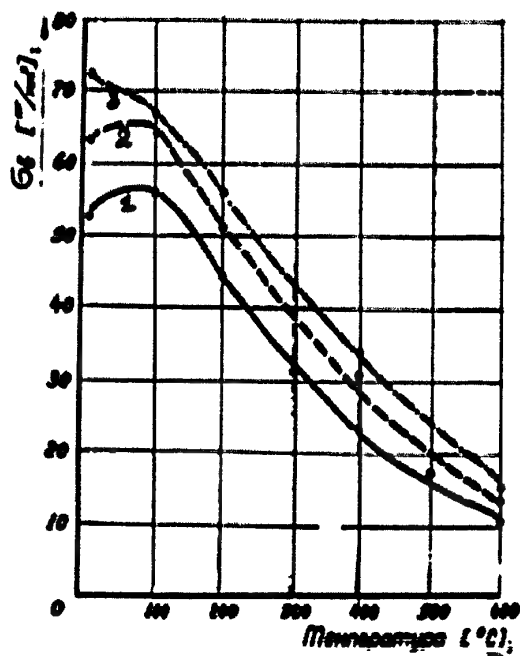


Рис 8. Изменение предела прочности литого и закаленного урана в зависимости от температуры испытания (металл одной плавки).

- 1- уран литой
 2- уран, закаленный из β -фазы
 3- уран, закаленный из γ -фазы

2849-60

-25-

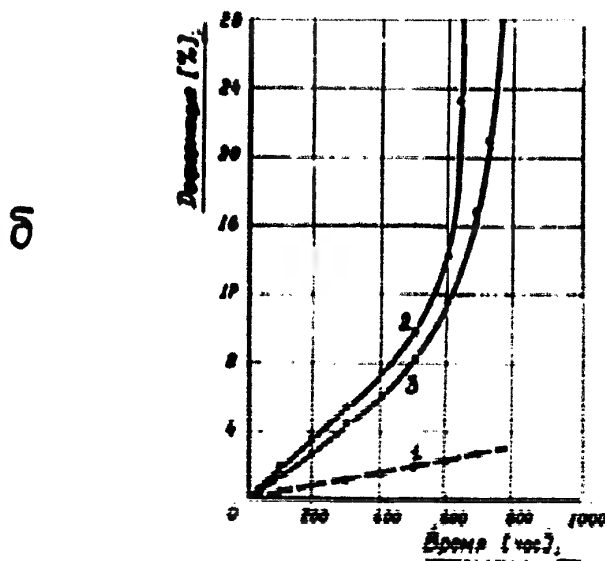
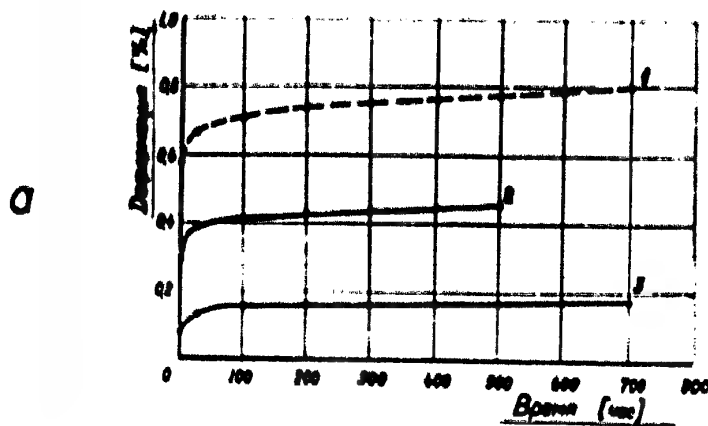


Рис 9. Первичные кривые ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана:

а) Температура испытания 300°

1- уран горячекатаный $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

2- уран, закаленный из β -фазы $\sigma = 20 \text{ кг/мм}^2$

3- уран, закаленный из γ -фазы $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

б) Температура испытания 500°

1- уран горячекатаный $\sigma = 18 \text{ кг/мм}^2$

2- уран, закаленный из β -фазы

3- уран, закаленный из γ -фазы

-26-

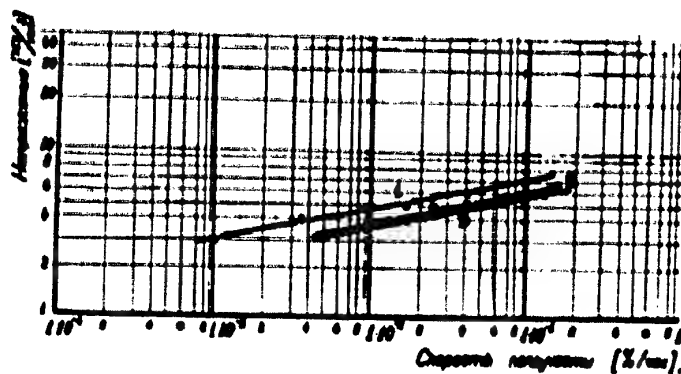


Рис 10. Изменение скорости ползучести для горячекатаного и горячекатаного закаленного урана.

Содержание примесей: $Fe = 4,8 \cdot 10^{-3}\%$;
 $Si = 1,4 \cdot 10^{-3}\%$; $C = 0,01\%$

1- уран горячекатаный

2- уран, закаленный из β - фазы

3- уран, закаленный из γ - фазы

-27-

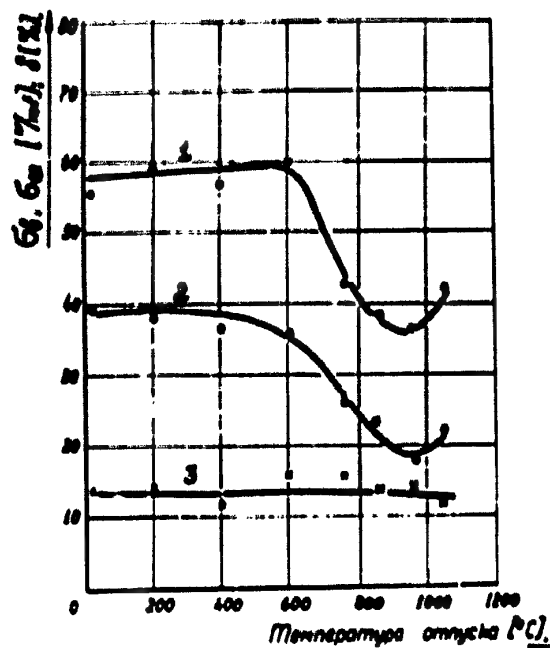


Рис II. Изменение механических свойств урана, закаленного из γ -фазы в зависимости от температуры отпуска.

(Нагрев до 850° ; выдержка 30 мин; охлаждение в масле; отпуск при указанных температурах в течение 30 минут.

Испытания проведены при 20°)

- 1- предел прочности - σ_s [кг/мм²]
 2- условный предел текучести - $\sigma_{0.02}$ [кг/мм²]
 3- относительное удлинение - δ [%]

-26-

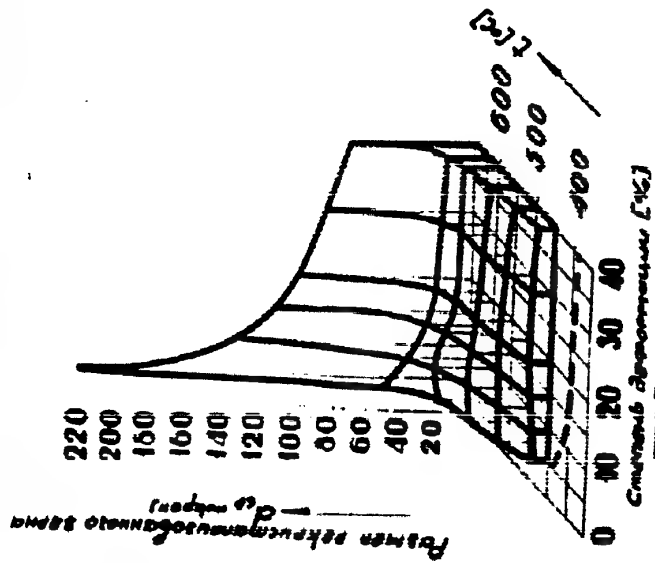


Рис 12. Приближенная диаграмма рекристаллизации урана. (Горячекатаный уран, деформация путем прокатки при комнатной температуре; продолжительность отжига после прокатки - 10 часов).

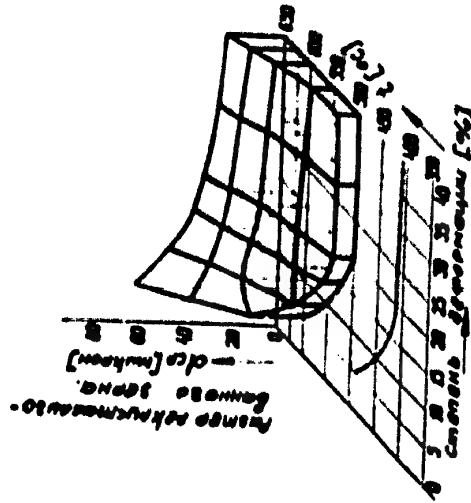


Рис 13. Приближенная диаграмма рекристаллизации сплава урана с 0,1% молибдена. (Обработка та же, что и для металла рис 12.).

Пунктирная кривая соответствует порогу рекристаллизации, определенному методом рентгенографического анализа

2849-60

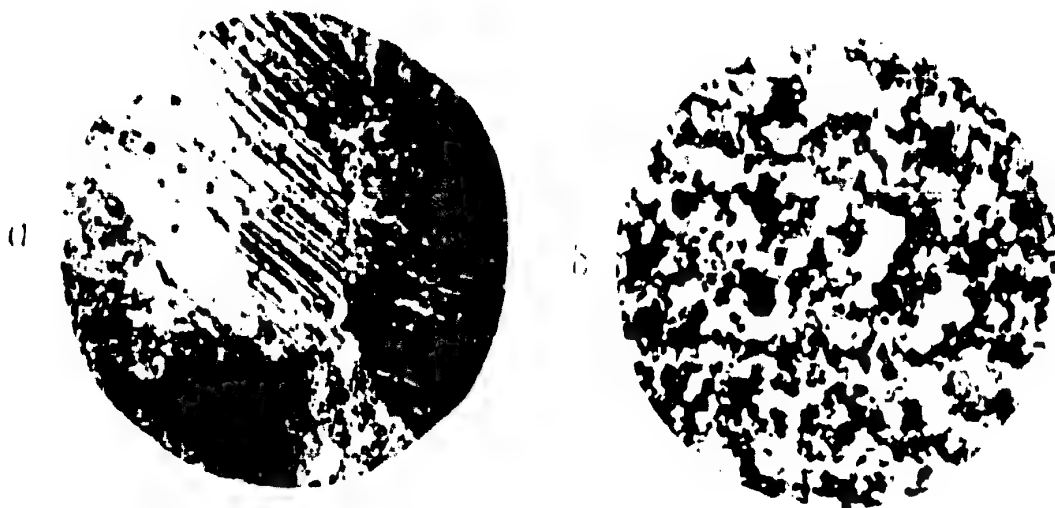


Рис I4. Изменение структуры урана после деформации и отжига при температурах α -области:

- а) исходный горячекатаный уран $\times 70$
 б) уран, прокатанный при 400°
 со степенью деформации 60% и отожженный при 600° в течение 2-х часов $\times 200$

2849-60

-3(-

a

б

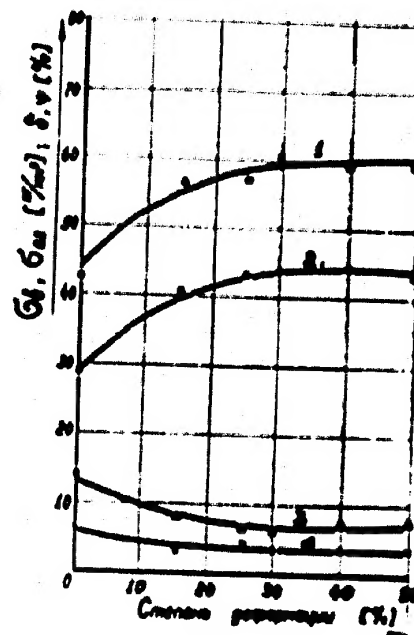
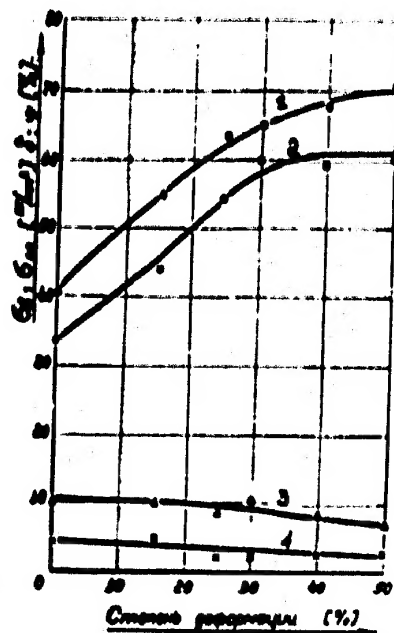


Рис 15. Изменение механических свойств урана в зависимости от степени деформации при прокатке. (Уран прокатан при 500°; образцы вырезаны из прутков в направлении прокатки).

а) без отжига

б) после отжига при 600° в течение 2-х часов

1- предел прочности - $\sigma_{\text{в}}$ [кг/см²]

2- условный предел текучести - $\sigma_{\text{т}}$ [кг/см²]

3- относительное удлинение - δ [%]

4- относительное сужение площади поперечного сечения - ψ [%]

-31-

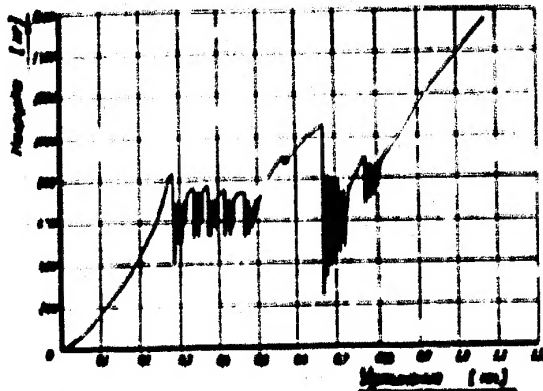


Рис 16. Кривая "нагрузка-деформация" для литового рекристаллизованного урана.

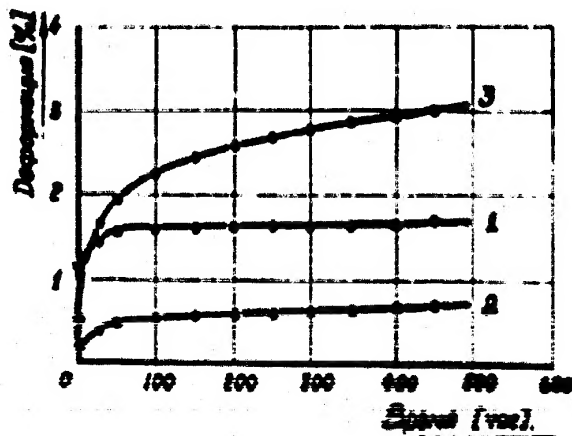


Рис 17. Влияние режима обработки в области на сопротивление урана ползучести при 800° $\sigma = 22 \text{ кг/мм}^2$
 1-й уран горячекатаный
 2-й уран, прокатанный в области со степенью деформации 60%
 3-й уран, прокатанный в области со степенью деформации 60% и отожженный при 600° в течение 2-х часов

37

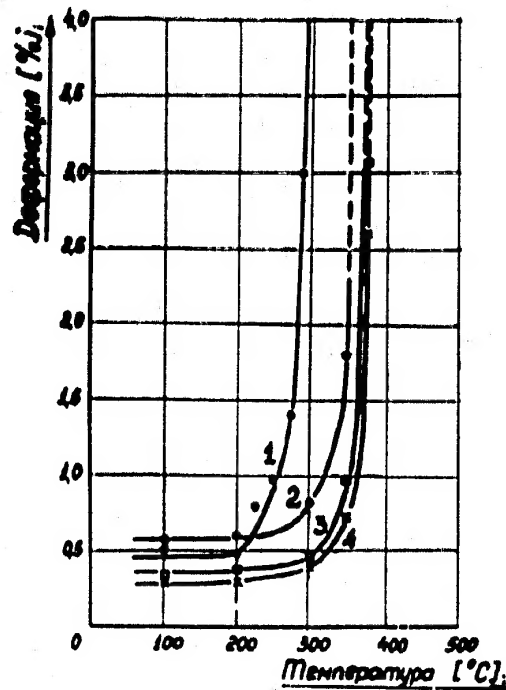


Рис 16. Изменение температурного интервала начала ускоренной ползучести урана в зависимости от состояния. (Деформация за 500 часов испытания при напряжении равном 22 кг/мм^2).

- 1- рекристаллизованный уран
- 2- горячекатаный уран
- 3- уран, закаленный в воду из β -области
- 4- уран, закаленный в воду из γ -области.

2849-60

53

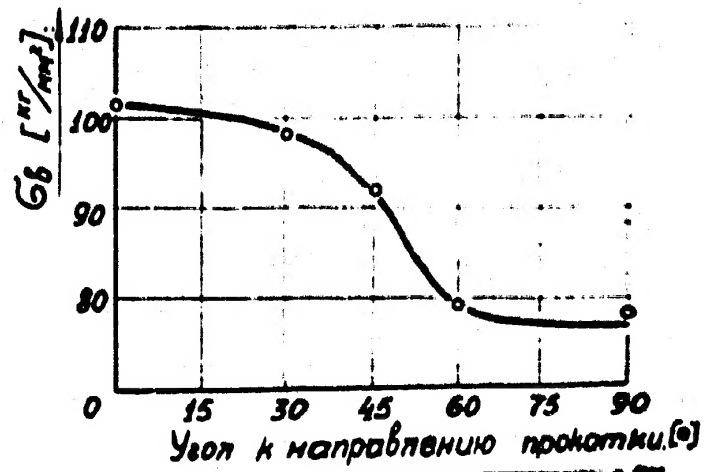


Рис 19. Изменение предела прочности при растяжении листового текстурированного урана в зависимости от направления вырезки образцов. (Прокатка при 200° со степенью деформации 60%; рекристаллизационный отжиг при 600° - 2 ч).